3А

УДК 004.89, 004.93

А.В. Агарков
Институт проблем искусственного интеллекта МОН Украины и НАН Украины, г. Донецк
Украина, 83048, г. Донецк, ул. Артема, 118-б

Поиск соответствия между ключевыми точками стереоизображений на основе применения графов

A.V. Agarkov
Institute of Artificial Intelligence MES of Ukraine and NAS of Ukraine, c. Donetsk
Ukraine, 83048, c. Donetsk, Artema st., 118-b

Stereo Images Key Points Matching Based on Graphs Applying

А.В. Агарков
Інститут проблем штучного інтелекту МОН України і НАН України, м. Донецьк
Україна, 83048, м. Донецьк, вул. Артема, 118-б

Пошук відповідності між ключовими точками стереозображень на основі застосування графів

В работе рассмотрена задача поиска соответствий между ключевыми точками изображений стереопар. Изображения стереопары представлены графами, каждой вершине которых соответствует ключевая точка, а ребра отображают отношения между ними. Соответствие между ключевыми точками следует из изоморфных пересечений рассматриваемых графов. Поиск данных пересечений осуществляется с помощью метода построения дополнительного графа-пирамиды. Показано, что использование взаимного расположения ключевых точек и метода на основе использования дополнительного графа-пирамиды позволяет качественно решать рассматриваемую задачу без привлечения сложных дескрипторов ключевых точек, учитывающих их индивидуальные особенности.
Ключевые слова: распознавание изображений, ключевые точки, сравнение графов, стерео-зрение, соответствие между ключевыми точками.

In this paper is considered the problem of finding correspondences between key points of stereo images. Stereo images are presented by graphs each vertex of which corresponds to the key point, and the edges represent the relationships between them. The correspondence between the key points is a result of isomorphic intersection of graphs. Search graphs intersections by using the method of constructing an additional graph pyramid. It is shown that the use of the relative position of key points and the method based on the use of an additional graph pyramid can efficiently solve the problem under consideration without involving complex descriptors of key points that take into account their individual characteristics.
Key Words: pattern recognition, key points, graphs matching, stereo vision, key points matching.

У роботі розглянута задача пошуку відповідностей між ключовими точками зображень стереопар. Зображення стереопари представлені графами, кожній вершині яких відповідає ключова точка, а ребра відображають відносини між ними. Відповідність між ключовими точками випливає з ізоморфних перетинань розглянутих графів. Пошук даних перетинань здійснюється за допомогою методу побудови додаткового графа-піраміди. Показано, що використання взаємного розташування ключових точок і методу на основі використання додаткового графа-піраміди дозволяє якісно вирішувати розглянуту задачу без залучення складних дескрипторів ключових точок, які враховують їх індивідуальні особливості.
Ключові слова: розпізнавання зображень, ключові точки, порівняння графів, стереозір, відповідність між ключовими точками.

Введение

В последние годы в области распознавания изображений интенсивно развивается направление на основе использования ключевых точек (локальных инвариантных черт, характерных структурных признаков, структурных элементов) [1-3]. Данное направление является очень перспективным, поскольку использование множеств ключевых точек изображений позволило добиться инвариантности относительно масштаба, поворотов и аффинных искажений при выделении и распознавании объектов. Использование данного подхода позволило в значительной степени ослабить влияние освещённости и шумов на результат распознавания.

Суть данного подхода заключается в выделении на изображении множества ключевых точек и последующим поиске подмножества данного множества, соответствующего объекту интереса (целевому объекта), который представлен шаблоном в виде множества ключевых точек. Каждая ключевая точка описывается с помощью дескриптора, который отражает яркостные свойства изображения в её окрестности. Для выделения и описания ключевых точек к настоящему времени разработано довольно большое количество детекторов и дескрипторов [4-6].

Для выделения искомого подмножества ключевых точек используется два подхода. В первом – выделение искомого подмножества состоит из двух этапов – (1) поиск соответствий между ключевыми точками шаблона и изображения на основе сравнения дескрипторов, (2) выделение искомого подмножества на основе использования найденных соответствий. Успех выполнения первого этапа в значительной степени зависит от выбранного дескриптора. А качество выполнения второго этапа, в свою очередь, зависит от качества выполнения первого. Это делает дескриптор, который отражает индивидуальные особенности ключевых точек, основным элементом для выделения искомого подмножества. Для выделения подмножества, соответствующего шаблону искомого объекта, используются различные методы – RANSAC [7], обобщённый метод Хафа [1], различные метрики для сравнения множеств [8], [9].

Второй подход, который начал развиваться не так давно, основан на использовании взаимного расположения ключевых точек [10-13]. Один из способов это сделать – представить множество ключевых точек в виде графа, каждой вершине которого соответствует отдельная ключевая точка, а ребра отображают отношения между ними [12], [13]. Искомому подмножеству соответствует подграф, изоморфный графу-шаблону. Из найденного изоморфизма следует соответствие между отдельными ключевыми точками.

Данная работа посвящена развитию второго подхода. Рассматривается задача поиска соответствий между ключевыми точками изображений стереопары, которые представлены графами, вершинам которых соответствуют отдельные ключевые точки. Для описания отдельных ключевых точек используются общие яркостные характеристики изображения в их окрестности, в отличие от используемых в настоящее время дескрипторов, которые содержат значительно больше информации, отображающей их индивидуальные особенности. Однако использование информации о взаимном расположении ключевых точек, которая отображена с помощью рёбер графа, позволяет качественно решать данную задачу. Сравнение графов проводится с помощью метода на основе использования дополнительного графа-пирамиды [13-15].

Цель работы:

1. Показать, что для качественного поиска соответствий между ключевыми точками стереопары достаточно использовать общие яркостные характеристики ключевых точек (не учитывать их индивидуальные особенности), но при этом необходимо учитывать их взаимное расположение;

2. Показать эффективность метода на основе использования дополнительного графа-пирамиды для выделения подмножеств ключевых точек со сходным взаимным расположением.

Описание изображений стереопары и их сравнение

Основной проблемой в стереозрении является поиск соответствий между отдельными точками на изображениях, которые отвечают одной и той же точке на реальном объекте. В данном случае задача ограничивается рассмотрением ключевых точек. Изображения стереопары представляется в виде графа, каждой вершине которого соответствует ключевая точка, выделенная с помощью оператора DoG. Атрибут каждой вершины представляет собой набор параметров, дающих общую характеристику соответствующих областей. Ребрами соединены все пары вершин графа, т.е. в данном случае изображения представляют графы-клики. Атрибутом рёбер является расстояние между центрами областей, соответствующих вершинам, инцидентным данным рёбрам.

Дескриптор ключевой точки изображения, соответствующий вершине v_i графа G, описывающего изображение, представляет собой набор следующих параметров: координаты центра области в плоскости изображения (x_i, y_i), характерный масштаб области σ_i, значение сглаживания по гауссовой маске $G(x_i, y_i, \sigma_i)$ с масштабом, соответствующим характерному масштабу области σ_i, мера Гессиана $H(x_i, y_i, \sigma_i)$, разница между значениями гауссова сглаживания в данной точке с разными масштабами $\Delta G(x_i, y_i, \sigma_i)$. По сравнению с дескрипторами, используемыми другими исследователями, данный набор параметров отличается некоторой «ущербностью», отсутствием возможности отобразить индивидуальные особенности ключевых точек. Однако следует помнить, что при поиске соответствий между точками упор делается, в основном, на анализ их взаимного пространственного положения в плоскости изображения.

Для того, чтобы сравнить дескрипторы двух ключевых точек, принадлежащих разным изображениям стереопары и соответствующим вершинам $v_i^L \in G^L$ и $v_j^R \in G^R$, используются следующие величины

$$r_\sigma(v_i^R, v_j^L) = \frac{\max(\sigma_i^R, \sigma_j^L)}{\min(\sigma_i^R, \sigma_j^L)},$$

$$r_G(v_i^R, v_j^L) = \frac{\max\left(G(x_i^R, y_i^R, \sigma_i^R), G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L)\right)}{\min\left(G(x_i^R, y_i^R, \sigma_i^R), G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L)\right)},$$

$$r_H(v_i^R, v_j^L) = \frac{\max\left(H(x_i^R, y_i^R, \sigma_i^R), H(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L)\right)}{\min\left(H(x_i^R, y_i^R, \sigma_i^R), H(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L)\right)},$$

$$r_{\Delta G}(v_i^R, v_j^L) = \frac{\max\left(\Delta G(x_i^R, y_i^R, \sigma_i^R), \Delta G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L)\right)}{\min\left(\Delta G(x_i^R, y_i^R, \sigma_i^R), \Delta G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L)\right)}$$

и условия

$$r_\sigma(v_i^R, v_j^L) \le T, \tag{1}$$

$$r_G(v_i^R, v_j^L) \le T, \tag{2}$$

$$r_H(v_i^R, v_j^L) \le T, \tag{3}$$

$$0 \le r_{\Delta G}(v_i^R, v_j^L) \le T, \tag{4}$$

где T – некий порог, который выбирается в пределах $1 \le T \le 1.5$. Если эти условия выполняются, то области считаются схожими, и пара вершин (v_i^R, v_j^L) образует вершину производного графа, который используется для сравнения графов [13], [14]. Каждой вершине производного графа соответствует пара вершин сравниваемых графов, если их атрибуты сходны. Ребрами в производном графе соединяются только вершины, которым соответствуют смежные вершины сравниваемых графов, и атрибуты соответствующих рёбер сходны. Применение данного критерия предполагает, что изображения стереопары имеют примерно равную яркость и контрастность, и расстояние между положениями камер намного меньше, чем расстояние камер от сцены. Поэтому ключевые точки считаются сходными, если каждое из отношений соответствующих параметров лежит в определенном диапазоне. Для упрощения всегда бралось отношение большего значения к меньшему, поэтому каждое такое отношение должно быть меньше некоего порога.

Далее будет показано, что для нахождения правильного соответствия между характерными областями изображений достаточно выполнения только части из этих условий, а именно – (3) и (4), что соответствует тому, что не учитываются характерные масштабы и яркости областей. Это связано с тем, что выполнение данных условий предназначено для проведения предварительной фильтрации кандидатов на соответствие, которое устанавливается, прежде всего, исходя из взаимного положения и отношения областей, которое отражено в атрибуте рёбер графа, описывающего изображение.

Каждое ребро характеризуется расстоянием $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ между центрами областей, соответствующими вершинам v_i и v_j, и инцидентным данному ребру $e_{ij} = e(v_i, v_j) : e_{ij}, v_i, v_j \in G$. Однако, для того, чтобы результат сравнения графов был инвариантен масштабу, рассматриваются отношения характерных масштабов вышеупомянутых областей к расстоянию l_{ij} и друг другу :

$$a_{ij,1} = \sigma_i / l_{ij},$$

$$a_{ij,2} = \sigma_j / l_{ij},$$

$$a_{ij,3} = \sigma_i / \sigma_j,$$

$$a_{ij,4} = G(x_i, y_i, \sigma_i) / G(x_j, y_j, \sigma_j),$$

где σ_i и σ_j – характерные масштабы соответствующих областей, $G(x_i, y_i, \sigma_i)$ и $G(x_j, y_j, \sigma_j)$ – значение яркости изображения в соответствующих точках после гауссова сглаживания с характерными масштабами σ_i и σ_j, соответственно.

При сравнивании дескрипторов рёбер, инцидентным вершинам графов G^L и G^R, которые представляют соответственно левое и правое изображения стереопары, рассматривается среднеквадратичное отклонение от единицы по всем отношениям между соответствующими параметрами, т.е.

$$E(a_{ij}^L, a_{lk}^R) = \sum_{m=1}^{4} \left(\frac{a_{ij,m}^L}{a_{lk,m}^R} - 1\right)^2,$$

где a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R} – атрибуты рёбер $e_{ij}^{L} = e(v_i^L, v_j^L) : e_{ij}^{L}, v_i^L, v_j^L \in G^L$ и $e_{lk}^{R} = e(v_l^R, v_k^R) : e_{lk}^{R}, v_l^R, v_k^R \in G^R$.

Если значение $E(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R})$ меньше определённого порога

$$E(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R}) \le T_e \qquad (5)$$

то рёбра считаются совпадающими, и вершины производного графа (v_i^L, v_l^R) и (v_j^L, v_k^R) соединяются ребром.

Также использовался другой критерий для сравнения атрибутов рёбер, который основан на использовании следующих величин –

$$\widetilde{E}(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R}) = \sum_{m=1}^{3} \left(\frac{a_{ij,m}^{L}}{a_{lk,m}^{R}} - 1\right)^2 ,$$

который отличается от $E(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R})$ тем, что в правой части суммирование производится только до $m = 3$, а не до $m = 4$, что соответствует рассмотрению только геометрических отношений между характерными областями.

$$E_G(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R}) = \begin{cases} 1, если \ \max(|q_{ij}^{L}|, |q_{lk}^{R}|) \le T_G \\ 1, если \ \max(|q_{ij}^{L}|, |q_{lk}^{R}|) > T_G \ и \ q_{ij}^{L} q_{lk}^{R} > 0 \\ 0, если \ \max(|q_{ij}^{L}|, |q_{lk}^{R}|) > T_G \ и \ q_{ij}^{L} q_{lk}^{R} \le 0 \end{cases},$$

где $q_{ij}^{L} = 1 - a_{ij,4}^{L}$, $q_{lk}^{R} = 1 - a_{lk,4}^{R}$, T_G – порог, определяющий сходство характерных яркостей областей. Величина $E_G(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R})$ равна единице, если отношения характерных яркостей областей одного изображения совпадают, и нулю в противном случае. То есть выражение для $E_G(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R})$ можно записать в виде

$$E_G(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R}) = \begin{cases} 1, если \ \left(G(x_i^L, y_i^L, \sigma_i^L) \approx G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L) \ и \ G(x_l^R, y_l^R, \sigma_l^R) \approx G(x_k^R, y_k^R, \sigma_k^R)\right) \\ 1, если \ \left(G(x_i^L, y_i^L, \sigma_i^L) > G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L) \ и \ G(x_l^R, y_l^R, \sigma_l^R) > G(x_k^R, y_k^R, \sigma_k^R)\right) \\ 1, если \ \left(G(x_i^L, y_i^L, \sigma_i^L) < G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L) \ и \ G(x_l^R, y_l^R, \sigma_l^R) < G(x_k^R, y_k^R, \sigma_k^R)\right) \\ 0, если \ \left(G(x_i^L, y_i^L, \sigma_i^L) > G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L) \ и \ G(x_l^R, y_l^R, \sigma_l^R) < G(x_k^R, y_k^R, \sigma_k^R)\right) \\ 0, если \ \left(G(x_i^L, y_i^L, \sigma_i^L) < G(x_j^L, y_j^L, \sigma_j^L) \ и \ G(x_l^R, y_l^R, \sigma_l^R) > G(x_k^R, y_k^R, \sigma_k^R)\right) \end{cases},$$

что более понятно, но несколько громоздко. При применении данного критерия вершины производного графа (v_i^L, v_l^R) и (v_j^L, v_k^R) соединяются ребром, если выполняется условие

$$E_G(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R}) = 1 \ и \ \widetilde{E}(a_{ij}^{L}, a_{lk}^{R}) \le T_e. \qquad (6)$$

При расчёте параметров, соответствующих каждому из рёбер следует учитывать соответствие между вершинами, инцидентными данным рёбрам. То есть первая вершина, инцидентная данному ребру, должна соответствовать первой вершине, инцидентной другому ребру. Аналогично со вторыми вершинами.

При поиске соответствий между ключевыми точками изображений упор делается на их взаимное расположение и масштаб, и предварительный поиск возможных соответствий призван, прежде всего, уменьшить количество кандидатов, для сокращения времени анализа. Поэтому выбран такой набор параметров, характеризующих ключевые точки, который бы при сравнении позволял отбрасывать наиболее явные несоответствия, оставляя остальные на долю шумов, разности освещения и ракурса. Это также позволяет проводить предварительный отбор кандидатов за более короткое время.

Однако если есть необходимость в более точном отборе возможных соответствий, можно использовать дескрипторы, которые точнее описывают области изображения.

Поскольку графы, соответствующие изображениям стереопары, являются кликами, то их сравнение проводится с помощью поиска множества максимальных клик, представленного в работе [15], который проводится в производном графе. Данный поиск осуществляется на основе использования формирования дополнительного графа-пирамиды. Суть его заключается в разбиении исходного графа на подграфы с последующим их объединением, если данное объединение удовлетворяет заданному условию. Каждому подграфу разбиения ставятся в соответствие вершины графа-пирамиды.

В данном случае подграфы разбиения и их объединения должны быть кликами. Для того чтобы избежать пропуска и дублирования решений, пирамида формируется таким образом, чтобы каждая клика-тройка была учтена ровно один раз. Более подробно данная процедура описана в работе [15].

Результаты проведенных экспериментов

Предложенный способ поиска соответствий между ключевыми точками стереопар был применён для стереопар, которые часто используются другими исследователями для проверки качества своих методов, а именно «Map», «Sawtooth», «Tsukuba» и «Venus», левые изображения которых представлены на рис. 1.



a b c d

Рисунок 1 – Стереопары, которые были использованы в эксперименте: a – «Map», b – «Sawtooth», c – «Tsukuba», d – «Venus»

Результатом сравнения графов, представляющих изображения стереопары, является подграф производного графа $G_R^P \subset G^P$, каждая вершина которого представляет пару вершин, отражающих найденное соответствие между ключевыми точками изображений стереопары. Поскольку ключевые точки характеризуются координатами их центров и масштабом, то каждое найденное соответствие можно представить в виде $p_i = (x_i^L, y_i^L, \sigma_i^L; x_i^R, y_i^R, \sigma_i^R)$, $i = 1,..., N$, где x_i^L, y_i^L и x_i^R, y_i^R – координаты центров соответствующих областей левого и правого изображений стереопары, σ_i^L, σ_i^R – характерные масштабы данных областей, N – количество найденных соответствий.

Для оценки качества полученных результатов используются следующие значения

$$B = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(e(p_i) > \delta_e),$$

$$e(p_i) = \frac{1}{\sigma_i^R}\sqrt{(x_i^L - d_T(p_i) - x_i^R)^2 + (y_i^L - y_i^R)^2},$$

где $\delta_e = 0.5$, $d_T(p_i)$ – истинная диспаратность для пикселя левого изображения стереопары с координатами (x_i^L, y_i^L). Значение $e(p_i)$ характеризует отклонение от истинного положения пикселя правого изображения (x_i^R, y_i^R), который соответствует пикселю (x_i^L, y_i^L) левого, отнесённого к характерному масштабу области правого изображения. То есть, чем больше размер характерной области, тем на большее расстояние от истинного положения может сместиться найденная соответствующая точка.

Также используется доля пикселей, для которых доля отклонения от истинного положения больше установленного порога, т.е. выполняется условие $e(p_i) > \delta_e$, отнесённая к общему количеству найденных соответствий

$$B_p = \frac{1}{N}\sum_{n}\Delta(p_i),$$

где

$$\Delta(p_i) = \begin{cases} 1, & e(p_i) > \delta_e \\ 0, & e(p_i) \le \delta_e \end{cases}.$$

Для того чтобы определить, как влияют на качество результата точность сравнения атрибутов вершин и рёбер исходных графов, описывающих изображения стереопары, а также применение различных условий при построении производного графа, экспериментально были получены зависимости значений B, B_p и N от порогов T и T_e при применении комбинаций условий (1 – 5) и (3, 4, 6) для всех рассматриваемых стереопар. Значение T изменялось в диапазоне от 1,0 до 1,15 включительно с шагом 0,0125. Значение T_e изменялось в диапазоне от 0,05 до 0,6 включительно с шагом 0,05. Причем если время поиска соответствий превышало определённое значение, то вычисления прекращались. Поэтому для некоторых значений порогов B, B_p и N не определены. Это требование связано с тем соображением, что поиск соответствий должен проводиться как можно быстрее и большое время для получения решения считается неприемлемым. Экспериментальные результаты представлены в табл. 1 – 7. Представлены результаты только для стереопары «Map», поскольку для неё были получены наихудшие значения.

Наиболее узкий диапазон значений порогов T и T_e для обеих комбинаций условий, при которых качество может считаться приемлемым ($B \le 1.0$ и $B_p \le 0.1$), наблюдается у стереопары «map». В табл. 1 – 4 представлены значения B и B_p для указанных выше значений T и T_e. Приведены значения только для диапазона T_e от 0,05 до 0,3, поскольку, как показали эксперименты, именно он представляет интерес.

При значении $T = 1{,}0$ количество вершин в производном графе рано нулю, что означает, что при таком пороговом значении ни для одной вершины производного графа нет ни одного кандидата на соответствие. Поэтому для $T = 1{,}0$ значения B

и B_p не определены. При значении $T = 1{,}0125$ точность найденных соответствий очень низкая. Это происходит потому, что не для всех вершин опорного графа среди кандидатов на соответствие присутствуют правильные варианты, и найденное соответствие – это наиболее близкий вариант, составленный из имеющихся кандидатов. Однако необходимо заметить, что при применении комбинации условий (3, 4, 6) качество полученного результата заметно выше, чем при использовании условий (1 – 5), хотя последние значительно строже, чем первые.

Таблица 1 – Значение B при применении условий (1 – 5) для стереопары «Мар»

	T_e					
T	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
1,0000						
1,0125	54,808	54,808	54,808	54,808	54,808	54,808
1,0250	0,000	3,122	3,122	4,454	7,654	7,654
1,0375	0,000	0,000	0,000	0,783	4,689	4,689
1,0500	0,000	0,000	0,614	0,614	0,614	0,880
1,0625	0,000	0,537	1,203	1,589	2,001	2,335
1,0750	0,161	0,661	1,548	1,910	2,811	3,438
1,0875	0,692	0,150	2,230	1,622	3,456	3,438
1,1000	0,658	1,335	1,288	2,395	4,229	4,011
1,1125	0,797	1,207	1,246	2,025	3,357	3,450
1,1250	0,782	1,287	1,246	1,946	4,395	3,737
1,1375	0,782	1,508	1,462	2,138	3,525	3,859
1,1500	0,764	1,111	1,839			

Таблица 2 – Значение B_p при применении условий (1 – 5) для стереопары «Мар»

	T_e					
T	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
1,0000						
1,0125	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
1,0250	0,000	0,111	0,111	0,200	0,200	0,200
1,0375	0,000	0,000	0,000	0,048	0,136	0,136
1,0500	0,000	0,000	0,029	0,029	0,029	0,057
1,0625	0,000	0,025	0,070	0,091	0,114	0,116
1,0750	0,026	0,048	0,111	0,130	0,167	0,208
1,0875	0,051	0,024	0,133	0,109	0,208	0,208
1,1000	0,049	0,114	0,122	0,160	0,235	0,250
1,1125	0,071	0,133	0,140	0,189	0,264	0,278
1,1250	0,093	0,152	0,140	0,208	0,309	0,304
1,1375	0,093	0,149	0,157	0,222	0,268	0,298
1,1500	0,091	0,167	0,189			

Особенно это заметно при малых значениях порога T_e. При дальнейшем увеличении порога T происходит значительное увеличение точности сравнения – при $1{,}025 \le T \le 1{,}0625$ и $T_e = 0{,}05$ нет ни одной ошибки в найденных соответствиях. При увеличении T_e наблюдается рост ошибки, однако для, практически, всех T_e при $T = 1{,}0625$ ошибка минимальна. Причем это наблюдается для обеих комбинаций условий.

Таблица 3 – Значение B при применении условий (3, 4, 6) для стереопары «Map»

	T_e					
T	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
1,0000						
1,0125	4,935	5,872	18,824	22,133	8,904	57,173
1,0250	0,000	1,713	1,390	8,664	1,757	1,207
1,0375	0,000	0,000	0,201	2,008	3,420	1,419
1,0500	0,000	0,421	0,826	1,137	1,507	1,864
1,0625	0,000	0,000	0,766	1,867	1,737	2,483
1,0750	0,632	0,420	0,870	1,857		
1,0875	0,031	1,586	0,988			
1,1000	0,324	0,940				
1,1125	0,718					
1,1250	1,000					
1,1375						
1,1500						

Таблица 4 – Значение B_p при применении условий (3, 4, 6) для стереопары «Map»

	T_e					
T	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
1,0000						
1,0125	0,125	0,222	0,500	0,545	0,500	0,833
1,0250	0,000	0,105	0,100	0,222	0,095	0,095
1,0375	0,000	0,000	0,037	0,107	0,179	0,103
1,0500	0,000	0,029	0,083	0,081	0,135	0,132
1,0625	0,000	0,000	0,073	0,133	0,133	0,191
1,0750	0,056	0,050	0,093	0,146		
1,0875	0,028	0,071	0,133			
1,1000	0,056	0,136				
1,1125	0,108					
1,1250	0,125					
1,1375						
1,1500						

Из приведенных в табл. 1 – 4 значений видно, что приемлемого уровня ошибки наблюдаются при $T_e \le 0{,}15$. И это не зависит от того, какие условие были применены. Хотя набор условий (1 – 5) соответствует тому, что при поиске соответствий

между изображениями стереопары было учтено, что они имеют примерно одинаковую яркость и контрастность, а также то, что соответствующие характерные области имеют примерно равный характерный масштаб, а условия (3, 4, 6) учитывают только взаимное геометрическое расположение областей инвариантное к масштабу, и весьма грубое отношение между характерными яркостями областей, при малых значениях T_e разница в качестве результата незначительна. Это означает, что для того, чтобы найти точное соответствие между областями, не нужно учитывать характерный масштаб отдельных областей и их яркость, достаточно учесть только то, как там меняется яркость, взаимное расположение областей и примерное отношение между их характерными яркостями.

Однако, для того, чтобы получить точное (правильное) соответствие между областями, не учитывая точно соотношения их яркостей, необходимо как можно точнее учесть их взаимное геометрическое положение.

В табл. 5 – 7 представлены значения B, B_p и N для стереопары «map» для значений порога T равным 1,02 и 1,125, при применении наборов условий (1-5) – A, (3-5) – B и (3, 4, 6) – C.

Данные, представленные в табл. 5 – 7, показывают, что применение более слабых условий при сравнении отдельных областей при более точном учёте их взаимного геометрического положения, даёт более правильные результаты, чем использование точного сравнения между отдельными областями.

Таблица 5 – Значение B для стереопары «Map» для значений порога T, равным 1,02 и 1,125, при применении наборов условий (1-5) – A, (3-5) – B и (3, 4, 6) – C

	$T = 1{,}02$			$T = 1{,}125$		
T_e	A	B	C	A	B	C
0,00	0,000	93,759	0,000	16,469	16,469	0,000
0,025	0,000	0,703	0,000	0,676	0,198	0,499
0,05	2,741	0,926	3,037	0,782	1,038	1,000
0,10	2,741	2,574	0,653	1,287	0,979	1,345
0,15	33,020	5,352	1,475	1,246	1,953	0,831

Таблица 6 – Значение B_p для стереопары «Map» для значений порога T равным 1,02 и 1,125, при применении наборов условий (1-5) – A, (3-5) – B и (3, 4, 6) – C

	$T = 1{,}02$			$T = 1{,}125$		
T_e	A	B	C	A	B	C
0,00	0,000	1,000	0,000	1,000	1,000	0,000
0,025	0,000	0,077	0,000	0,105	0,079	0,088
0,05	0,167	0,067	0,077	0,093	0,095	0,125
0,10	0,167	0,167	0,071	0,152	0,167	0,186
0,15	0,571	0,353	0,133	0,140	0,208	0,152

Таблица 7 – Значение N для стереопары «Мар» для значений порога T равным 1,02 и 1,125, при применении наборов условий (1-5) – A, (3-5) – B и (3, 4, 6) – C

	$T = 1{,}02$			$T = 1{,}125$		
T_e	A	B	C	A	B	C
0,00	1	1	3	1	1	10
0,025	5	13	12	38	38	34
0,05	6	15	13	43	42	40
0,10	6	18	14	46	48	43
0,15	7	17	15	50	53	46

Аналогичные результаты были получены для остальных стереопар. Следует также заметить, что поиск соответствий при $T = 1{,}02$ эквивалентен поиску на правом изображении стереопары некоего объекта, характеризуемого областями левого изображения, у которых среди кандидатов на соответствие есть верные варианты. То есть можно сказать, что выводы, сделанные при анализе результатов применения методов, предложенных в данной работе, для поиска соответствий между изображениями стереопар справедливы и для случая поиска на изображении целевых объектов.

Выводы

В статье на примере решения задачи поиска соответствий между ключевыми точками изображений стереопары рассмотрено применение описания изображений в виде графов и средств их обработки (метода на основе формирования дополнительного графа-пирамиды) для решения задач распознавания зрительных образов. Показано, что для качественного поиска соответствий между ключевыми точками изображений достаточно использовать их общие яркостные характеристики, но при этом необходимо учитывать их взаимное расположение. Эффективным средством для хранения информации о взаимном расположении ключевых точек является граф. Метод сравнения графов на основе формирования дополнительного графа-пирамиды является эффективным средством для поиска подмножеств ключевых точек, которые имеют сходное взаимное расположение. Таким образом, получил развитие метод поиска целевых объектов на изображениях на основе использования взаимного расположения структурных элементов за счёт использования сравнения графов на основе формирования дополнительного графа-пирамиды, что дало возможность отказаться от использования сложных дескрипторов для описания отдельных ключевых точек.

Дальнейшие исследования будут посвящены использованию графов, описывающих изображения, и средств их обработки для решения задач построения плотной карты диспаратности для стереопар, поиска целевых объектов на изображениях.

Литература

1. David G. Lowe Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / David G. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 2, № 60. – P.91-110.
2. Mikolajczyk K. Detection of local features invariant to affine transformations / Mikolajczyk K. // Ph.D. thesis. – France : Institut National Polytechnique de Grenoble. – 2002. – 171 p.
3. Krystian Mikolajczyk. Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors / Krystian Mikolajczyk and Cordelia Schmid // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60, № 1. – P. 63-86.

4. Krystian Mikolajczyk. A performance evaluation of local descriptors / Krystian Mikolajczyk and Cordelia Schmid // IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence. – 2005. – Vol. 27, № 10. – P. 1615-1630.
5. Gyuri Dork'o. Maximally Stable Local Description for Scale Selection / Gyuri Dork'o and Cordelia Schmid // European Conference on Computer Vision. – Graz, Austria. – 2006. – Vol.4. – P. 504-516.
6. Winter M. Maximally Stable Corner Clusters: A novel distinguished region detector and descriptor / Winter M., Bischof H. and Fraundorfer F // 1st Austrian Cognitive Vision Workshop. – Zell an der Pram, Austria. – 2005. – P. 59-66.
7. Martin A. Fischer Random Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography / Martin A. Fischer and Robert C. Bolles // Commun. Assoc. Comp. Mach. – 1981. – Vol. 24. – P. 381-395.
8. Гороховатский В.А. Оценка сходства структурных объектов как множеств компонент / В.А. Гороховатский // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2011. – № 1. – С. 57-70.
9. Гороховатский В.А. Системы признаков на основе пространственно атрибутивных отношений структурных элементов изображений / Гороховатский В.А. // Бионика интеллекта. – 2011. – № 1 (75). – С. 48-51.
10. Гороховатский В.А. Фильтрация ложных соответствий дескрипторов ключевых точек на основе анализа геометрических данных / В.А. Гороховатский // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2009. – Т. 11, № 1. – С. 11-19. – ISSN 1560-9189.
11. Optimal Feature Matching Method using Bayesian Graph Theory / [Wan Hyun Cho, In Seop Na, Sun Worl Kim and Soo Hyung Kim] // International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering. – 2012. – Vol. 7, № 3. – P. 123-132.
12. Torresani L. Feature Correspondence Via Graph Matching: Models and Global Optimization. / Torresani L., Kolmogorov V., Rother C. // Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision: Part II. – 2008. – P. 596-609.
13. Агарков А.В. Метод сравнения двух графов за полиномиальное время / А.В. Агарков // Искусственный интеллект. – 2003. – № 4. – С. 172-184.
14. Агарков А.В. Поиск изоморфных пересечений двух графов за полиномиальное время / А.В. Агарков // Искусственный интеллект. – 2007. – № 2. – С. 62-74.
15. Агарков А.В. Поиск множества максимальных клик на основе метода построения дополнительного графа / А.В. Агарков // Искусственный интеллект. – 2011. – № 3. – С. 190-199.

Literatura

1. David G. Lowe Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / David G. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 2, № 60. – P.91-110.
2. Mikolajczyk K. Detection of local features invariant to affine transformations / Mikolajczyk K. // Ph.D. thesis. – Institut National Polytechnique de Grenoble, France. – 2002. – 171 p.
3. Krystian Mikolajczyk Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors / Krystian Mikolajczyk and Cordelia Schmid // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60, № 1. – P. 63-86.
4. Krystian Mikolajczyk and Cordelia Schmid. A performance evaluation of local descriptors // IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence. – 2005. – Vol. 27, № 10. – P. 1615-1630.
5. Gyuri Dork'o Maximally Stable Local Description for Scale Selection / Gyuri Dork'o and Cordelia Schmid // European Conference on Computer Vision. – Graz, Austria. – 2006. – Vol. 4. – P. 504-516.
6. Winter M. Maximally Stable Corner Clusters: A novel distinguished region detector and descriptor / Winter M., Bischof H. and Fraundorfer F // 1st Austrian Cognitive Vision Workshop. – Zell an der Pram, Austria. – 2005. – P. 59-66.
7. Martin A. Fischer Random Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography / Martin A. Fischer and Robert C. Bolles // Commun. Assoc. Comp. Mach. – 1981. – Vol. 24. – P. 381-395.
8. Gorokhovatsky V.O. Evaluation of the structural similarity of objects as sets of components / V.O. Gorokhovatsky // System Research & Information Technologies. – 2011. – № 1. – P. 57-70.
9. Gorokhovatsky V.O. Systems of features based on spatially-attributive relations of image structural elements / V.O. Gorokhovatsky // Bionics of Intelligence: Sci. Mag. – 2011. – № 1 (75). – P. 48-51.
10. Gorokhovatsky V.O. Filtering false correspondences descriptor points based on the analysis of geometrical data / V.O. Gorokhovatsky // Registration, storage and processing. – 2009. – V. 11, № 1. – P. 11-19. – ISSN 1560-9189.

11. Optimal Feature Matching Method using Bayesian Graph Theory / Wan Hyun Cho, In Seop Na, Sun Worl Kim and Soo Hyung Kim // International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering. – 2012. – Vol. 7, № 3. – P. 123-132.
12. Torresani L. Feature Correspondence Via Graph Matching: Models and Global Optimization. / Torresani L., Kolmogorov V., Rother C. // Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision : Part II. – 2008. – P. 596-609.
13. Agarkov A.V. The method of two graphs matching in polynomial time / A.V. Agarkov // Artificial Intelligence. – 2003. – № 4. – P. 172-184.
14. Agarkov A.V. Isomorphic Intersection of Two Graphs Searching in Polynomial Time / A.V. Agarkov // Artificial Intelligence. – 2007. – № 2. – P. 62-74.
15. Agarkov A.V. Search of the Set of Maximal Cliques Based on the Method for Constructing Complementary Graph / A.V. Agarkov // Artificial Intelligence. – 2011. – № 3. – P. 190-199.

RESUME

A.V. Agarkov

Stereo Images Key Points Matching Based on Graphs Applying

The paper considers the use of the description and recognition of images through the use of graphs to solve the problem of matching between the key points of the stereo image. As the description of images used a graph whose vertices correspond to the key points highlighted by a detector DoG, and the edges represent the relationships between them. The title line is a consequence of the isomorphism between subgraphs compared graphs descriptions. Search isomorphic intersection by using a method based on the formation of an additional graph pyramid. The use of these tools can effectively isolate a subset of the images key points that have similar relative positions, using only the general brightness characteristics of the key points, and information about the relative positions of pairs. This eliminated the need for complex descriptors that take into account the individual characteristics of the key points. The results obtained in this study suggest the applicability of the used means of image description and recognition based on the use of graphs for the detection and recognition of targets objects.

Статья поступила в редакцию 25.04.2013.